

ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ ПРОГРАММНОЙ И ГАРМОНИЧЕСКОЙ НАГРУЗОК ПРИ ИМИТАЦИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Бояринцев В.И., Костин В.И.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Метод программных испытаний на усталость [1] был разработан для имитации воздействия случайных эксплуатационных нагрузок на отдельные компоненты механических конструкций или на конструкцию в целом. Суть его заключается в создании такого закона изменения нагрузки во времени, который с заданной степенью точности воспроизводит эксплуатационную нагрузку как в отношении ее интенсивности, так и в отношении частоты ее приложения.*) Из-за трудности получения на испытательном оборудовании сложной непрерывной функции времени, особенно в области больших амплитуд, ее заменяют периодической ступенчатой гармонической функцией амплитудой гармоник, постоянной с в пределах заданного интервала времени (ступени). Совокупность ступеней с монотонно возрастающими и(или) монотонно убывающими в пределах периода амплитудами гармоник образуют блок программной нагрузки. Требуемая частота приложения нагрузки того или иного уровня, а следовательно и распределение амплитуд в блоке, задается соответствующим выбором относительного времени пребывания амплитуды ступени на заданном уровне

$$\theta_k = \frac{n_k}{N_{\text{БПН}}},$$

где n_k - число циклов гармоник с амплитудой σ_k , $N_{\text{БПН}} = \sum_{k=1}^C n_k$ - число циклов в блоке, C - количество ступеней в блоке ($i = 0, 1, \dots, C$).

С математической точки зрения блок программной нагрузки можно рассматривать как результат последовательного присоединения с течением времени ряда независимых друг от друга отрезков гармонического процесса с различными амплитудами и

*) Зависимость амплитуды нагрузки от частоты ее приложения традиционно называют *спектром амплитуд*. В современной теории случайных процессов термин *спектр амплитуд* имеет совершенно иной смысл, поэтому в дальнейшем во избежание терминологических недоразумений для обозначения указанной зависимости используется более корректный термин *распределение амплитуд*.

длительностями. В [2] получено следующее аналитическое выражение для удельной (за 1 цикл) информационной энтропии гармонической нагрузки:

$$h_0 = \ln \frac{\pi A}{2} , \quad (1)$$

где σ_a - амплитуда напряжения. Применим его для вывода соотношения, связывающего удельную энтропию блока программной нагрузки с его параметрами σ_k и θ_k , что позволит в рамках информационной гипотезы накопления усталостных повреждений [3] установить эквивалентность прочностной опасности программной и гармонической нагрузок.

Процесс программной нагрузки является, очевидно, периодической (детерминированной) функцией времени. Ее анализ статистическими методами становится возможным, если учесть основное условие, по которому синтезируется форма блока: амплитуды ступеней σ_k и относительные времена их действия θ_k выбираются с целью имитации случайного процесса с заданным распределением амплитуд. Величины θ_k неотрицательны и подчиняются условию

нормировки $\sum_{k=1}^C \theta_k = 1$, а значит их можно интерпретировать как

вероятность появления дискретной случайной величины σ_k .

В силу независимости ступеней энтропия блока равняется сумме энтропий отдельных ступеней. Из формулы Больцмана для энтропии S неравновероятных случайных величин следует, что энтропия блока программной нагрузки представляет собой сумму взвешенных энтропий отдельных ступеней:

$$h = \sum_{k=1}^C \theta_k h_k ,$$

где h_k - "случайная" энтропия, приписываемая амплитуде гармоники k -й ступени. Ее величина зависит от вероятности θ_k , но не зависит от амплитуды напряжения ступени σ_k и в этом смысле является "слепой". В то же время в силу независимости ступеней и на основании формулы (1) удельная энтропия блока программной нагрузки

$$h_{\text{БПН}} = \sum_{k=1}^C N_k \ln \frac{\pi \sigma_k}{2} .$$

Нормируя h БПН на число циклов в блоке $N_{\text{БПН}}$, получаем для удельной (за один цикл) энтропии блока программной нагрузки:

$$h_o = \sum_{k=1}^c \theta_k \ln \frac{\pi \sigma_k}{2}, \quad (2)$$

где $\theta_k = N_k / N_{\text{БПН}}$ - относительная длительность ступени.

Согласно информационной гипотезе накопления усталостных повреждений [3] две сравниваемые нагрузки имеют одинаковую повреждающую способность, если у них равны информационные мощности $P = \exp(h)$. Информационная мощность гармонической нагрузки равна

$$P_u = \exp\left(\ln \frac{\pi \sigma_a}{2}\right) = \frac{\pi \sigma_a}{2}, \quad (3)$$

а программного блока -

$$P_{\text{БПН}} = \exp\left(\sum_{k=1}^c \theta_k \ln \frac{\pi \sigma_k}{2}\right). \quad (4)$$

Приравнивая правые части уравнений (3) и (4), получаем амплитуду гармонического напряжения, эквивалентную в информационном смысле блоку программной нагрузки:

$$\sigma_{\text{эк}} = \frac{2}{\pi} \exp\left(\sum_{k=1}^c \theta_k \ln \frac{\pi \sigma_k}{2}\right).$$

Использование полученного соотношения на практике позволяет априорно оценить повреждающее действие эксплуатационных нагрузок и за счет этого сократить объем экспериментальных исследований при испытаниях на усталостную прочность.

Список литературы

1. Gassner E. Festigkeitsversuche mit wiederholter Belastung im Flugzeugbau. - Luftwissen, 1939, № 6, s.61...64.
2. В.И. Бояринцев, В.И. Костин. Энтропия гармонической нагрузки. статья в настоящем сборнике.
3. Костин В.И. Сравнительная оценка интенсивности вибрации с переменной во времени амплитудой эквивалентным значением виброскорости гармонических колебаний. Проблемы прочности, 1974, №9, с. 103...109.